



循环荷载下桩网复合地基受力变形模型试验研究

薛凯仁¹,夏靖洪²,刘开富¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018;2. 宁海县住房和城乡建设局,浙江宁波 315699)

摘要:采用缩尺比例为1:10的桩网复合地基模型,对循环荷载下软土地区桩网复合地基的受力变形特性进行试验研究。通过试验分析了循环荷载幅值、频率以及土工格栅层数对循环荷载下软土地区中桩网复合地基受力变形特性的影响,并结合曲线拟和方法探讨循环荷载下桩网复合地基中桩基的桩端阻力、桩侧总摩阻力与沉降变化之间的关系。研究表明:桩网复合地基沉降在循环荷载作用初期时发展速率较快,增加荷载幅值和频率会增大沉降,而上层格栅的加入能减小沉降。循环荷载下桩身轴力随桩深的增加先增大后减小,桩网复合地基桩身轴力随循环荷载幅值、频率和土工格栅层数的增大而增加。桩端阻力会随着地基沉降的发展而增大,桩侧总摩阻力则随着地基沉降的发展逐渐减小,不同荷载幅值、频率及土工格栅层数下桩网复合地基中的桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降的变化规律可分别用幂函数和多项式函数描述。研究结果可为软土地区高速公路设计与施工提供一定依据。

关键词:桩网复合地基;循环荷载;地基沉降;桩端阻力;桩侧总摩阻力

中图分类号: TS195.644

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)01-0157-10

引文格式:薛凯仁,夏靖洪,刘开富. 循环荷载下桩网复合地基受力变形模型试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(1):157-166.

Reference Format: XUE Kairen, XIA Jinghong, LIU Kaifu. Model test of stress and deformation characteristics of pile-net composite foundation under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(1):157-166.

Model test of stress and deformation characteristics of pile-net composite foundation under cyclic loading

XUE Kairen¹, XIA Jinghong², LIU Kaifu¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Ninghai County Housing and Urban-Rural Development Bureau, Ningbo 315699, China)

Abstract: Based on a series of pile-net composite foundation models at a reduced scale of 1:10, the stress and deformation characteristics of pile-net composite foundation in soft soil areas under cyclic loading were investigated. The influence of the cycle loading amplitude, frequency and number of geogrid layers on the stress and deformation characteristics of pile-net composite foundation under cyclic loading were analyzed. The relationship among pile end resistance, total pile side friction resistance and settlement changes in pile-net composite foundation under cyclic loading was further discussed by using curve fitting method. The results show that the settlement of pile-net composite foundation develops rapidly in the first stage of cyclic loading. The foundation settlement increases with the increase of the loading amplitude and frequency while decreases with the introduction of the upper geogrid. The axial force of the pile firstly increases and then decreases with the deepening of the pile under cyclic loading. The axial force of the pile-net composite foundation increases with the increase of load amplitude, frequency and number of geogrid

收稿日期:2022-08-12 网络出版日期:2022-11-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51878619);浙江省自然科学基金项目(LGG22E080015)

作者简介:薛凯仁(1997—),男,浙江瑞安人,硕士研究生,主要从事地基处理方面的研究。

通信作者:刘开富,E-mail:liukaifu@zstu.edu.cn

layers. The pile end resistance increases while the total pile side friction resistance gradually decreases with the development of foundation settlement. The variations of pile end resistance and total pile side friction resistance in pile-net composite foundation with foundation settlement under different load amplitudes, load frequencies and geogrid layer numbers can be described by power function and polynomial function respectively. The research results are expected to provide a basis for the design and construction of expressways in soft soil areas.

Key words: pile-net composite foundation; cyclic loading; foundation settlement; pile end resistance; total pile side friction

0 引言

沿海地区广泛分布的淤泥质软土地基,在车辆荷载下易产生不均匀沉降,甚至导致地基破坏。桩网复合地基是一种新兴的软土地基加固技术,因其加固效果较好,被广泛运用于高速公路的建设中^[1-2]。在桩网复合地基中,上部荷载主要依靠桩—网—土体系共同承担。在交通荷载下,由于桩—土刚度差所引起的差异沉降易在桩侧产生负摩阻力,会降低地基的承载变形能力,使得桩网复合地基失稳,缩短软土地区高速公路的服役年限^[3]。因此,循环荷载下桩网复合地基的受力变形特性是软土地区高速公路设计与施工的关注点之一。

许多研究人员通过室内模型试验和数值分析等方法研究了桩网复合地基的受力变形特性。例如,吕亚茹等^[4]通过有限元软件 ABAQUS 分析了复合地基中不同桩型桩侧摩阻力的分布特点,结果表明桩侧负摩阻力主要出现在桩身中上部,且桩侧阻力大小受到桩侧摩阻力大小和桩截面周长的影响,但该研究仅得到了单桩工况下的规律。考虑到单桩与群桩基础的工作特性差异,Jiang 等^[5]进一步研究了布置不同桩型的群桩—网复合地基的受力变形特性,结果表明桩身的中上段会出现负摩阻力。董俊利等^[6]基于室内模型试验,研究了螺纹桩网复合地基中桩身荷载传递特性,结果表明螺纹桩的桩身轴力沿深度方向逐渐减小且桩侧阻力大于桩端阻力,这与单桩复合地基的规律类似。为进一步研究桩网复合地基中加筋层数等因素对受力变形特性的影响,刘开富等^[7]通过 Plaxis3D 软件对刚性桩网复合地基的承载性状进行数值模拟研究,发现当荷载较大时增加土工格栅层数能有效减小桩网复合地基沉降。以上研究主要分析了静载或施工荷载下桩网复合地基的受力变形特性,但未考虑交通荷载工况下的桩网复合地基受

力变形特性。

许多研究者进一步研究了循环荷载下桩网复合地基的沉降与桩身变形特性。张玲等^[8]通过室内模型试验研究了循环荷载下筋箍碎石桩单桩复合地基的工作特性,研究发现桩—土应力分布主要取决于桩—土刚度差,加入土工格栅能将荷载进一步传递至桩顶。针对群桩基础,李天宝等^[9]利用多组刚柔性桩网复合地基模型试验,比较分析了循环荷载下刚—柔性和柔性桩网复合地基的地面沉降与桩身应变的变化规律。牛婷婷等^[10]和孙广超等^[11]通过缩尺无砟轨道 X 形桩—筏复合地基模型试验,分析了 X 形桩桩身动应力、桩侧摩阻力以及累计沉降随循环次数的变化规律,研究发现桩身应变会随着循环次数的增加而增加。但上述研究^[9-11]仅研究了单一循环荷载工况对桩网复合地基沉降及桩身变形特性的影响。为此,不少研究者通过改变荷载工况来研究循环荷载对桩网复合地基受力变形的影响。何杰等^[12]采用模型试验分析了循环荷载下桩网复合地基中的沉降及桩身应变随荷载幅值的变化规律,研究发现:桩身应变随着循环荷载幅值的增大而增大,且当荷载幅值较大时,土工格栅能有效提高桩—土应力比。杨以国等^[13]和陈贤可等^[14]通过室内刚柔性桩网复合地基模型试验,研究了不同循环荷载幅值下软土复合地基的沉降与桩身受力特性,试验结果表明地基沉降随着荷载幅值的增大而逐渐增大,荷载幅值对桩端阻力和桩侧总摩阻力的影响较大。虽然这些研究^[12-14]分析了循环荷载对桩网复合地基沉降和桩身变形的影响,考虑了循环荷载幅值对桩网复合地基沉降及桩身受力的影响,但未考虑循环荷载频率变化的影响,且对循环荷载下在软土地区中桩网复合地基桩端阻力、桩侧总摩阻力与沉降关系的研究涉及较少。

基于上述分析,本文设计了循环荷载下桩网复合地基受力变形模型试验,研究循环荷载幅值、频率以及土工格栅层数等因素对循环荷载下软土地区中

桩网复合地基的受力变形特性的影响,并分析循环荷载下桩网复合地基的桩端阻力、桩侧总摩阻力与沉降变化之间的关系,以期为软土地区高速公路设计与施工提供依据。

1 桩网复合地基模型试验

1.1 试验装置及材料

室内模型试验在浙江理工大学的岩土工程灾变模拟系统中进行。岩土工程灾变模拟系统由模型箱、液伺服加载系统和数据采集系统组成(如图 1 所示)。钢结构模型箱尺寸为 3000 mm×2000 mm×2000 mm,为方便观察加载过程中的土体变形情况,模型箱一侧的钢板用等厚的钢化玻璃代替。模型箱内表面铺设 0.5 mm 厚的塑料薄膜^[15],以保证模型箱内壁免受腐蚀并能有效减小土体与箱体之间的摩擦。加载板采用尺寸为 1000 mm×800 mm×30 mm 的钢板。液压伺服加载系统由油泵控制箱和加载作动器组成,加载作动器安装在模型箱顶部工字钢反力架上,最大可提供 50 kN 的动荷载以及 10 Hz 荷载频率。加载过程中的桩网复合地基坡顶竖向位移由安装在加载作动器上的传感器测量并进行实时采集,桩身应变则通过数据采集系统自动测量采集。

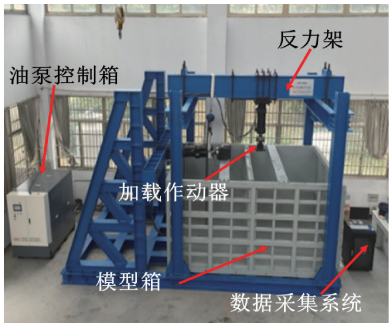


图 1 岩土工程灾变模拟系统现场照片

本文建立的试验模型的几何要素比例为 1:10。根据杭州地区典型的土层分布,模型箱内地基土从下至上分别为粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土与砂土,厚度分别为 300、750、200 mm 和 300 mm,土体的排列分布如图 2(a)所示,柔性桩的桩身应变片布置如图 2(b)所示。试验中软土层采用的淤泥质黏土为重塑的淤泥质黏土,砂垫层采用的砂土为细度模数和含水率分别为 1.6 和 7.3% 的细砂,试验土的基本物理力学指标如表 1 所示。土体黏聚力和内摩擦角通过直剪试验测定。

试验中模型桩的布置考虑了实际工程中的原型

尺寸与模型试验条件,采用 1:10 的相似系数,模型平面图示意图如图 2(c) 所示。试验中用外径 50 mm、壁厚 20 mm、长度 600 mm 的 PVC 管(刚度为 2 GPa)模拟柔性桩。在试验桩顶部均设置 150 mm×150 mm×30 mm 的铝制桩帽,并在桩帽中心处设置一个直径 50 mm、深度 20 mm 的圆孔,将 PVC 管与桩帽连接,实拍图如图 2(d)所示。柔性桩的桩底用 PVC 管帽封闭,以防土体进入桩内。桩间距根据模型试验条件,设置为 400 mm,边桩距左侧模型箱壁为 300 mm。土工格栅则采用双向拉伸塑料土工格栅 TGSG15-15,其拉伸屈力为 15 kN/m。试验中采用 120-AA 型应变片来测量桩身应变。

表 1 土体基本物理力学指标

土体类型	密度/ (g·cm ⁻³)	含水 率/%	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
粉质黏土	1.79	17.9	8.1	26.5	9.68
淤泥质黏土	1.57	42.1	12.1	10.4	1.46
砂土	1.83	7.3	0	33.0	24.2

1.2 试验方案

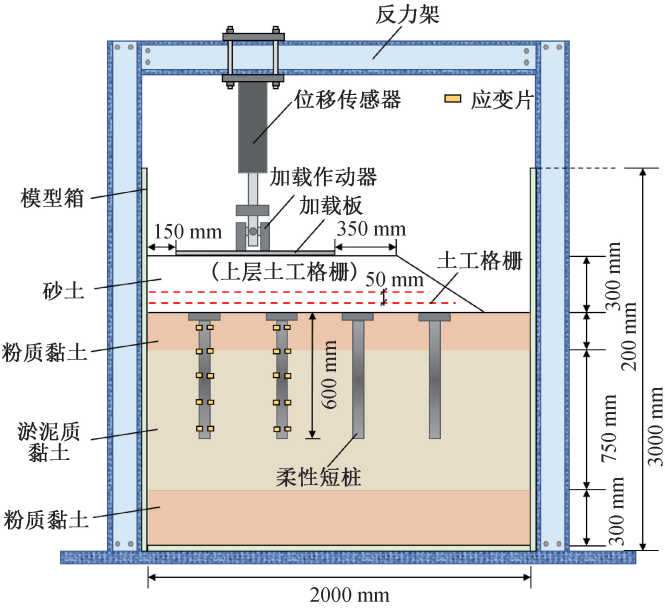
为分析循环荷载下桩网复合地基中桩基受力变形特性,本文设计并进行了一系列室内模型试验,模型试验方案如表 2 所示。试验中,地基土自下而上进行填筑,在施工前检查材料的含水量,以确保所用材料的含水量均匀。对于粉质黏土,每层填筑 100 mm 后用橡胶锤进行人工夯实处理,并将压实层厚度严格保持在(100±1)mm;对于淤泥质黏土,每层填筑 150 mm 并进行抹平,静置 2 d 后再进行下一层的填筑。进行路堤填筑时,按照分层预压原则每次填筑 50 mm 并预压 20 min,以保证填土的压实程度尽量一致。铺设土工格栅时,在粉质黏土层上方先均匀铺设 50 mm 的细砂层,以确保土工格栅铺放的平整程度。每层土工格栅间距为 50 mm,与每次填筑高度一致。柔性桩的桩身应变片布置如图 2(b)所示,桩身应变片布置在桩身内部以减少应变片与土体之间摩擦所产生的误差。完成应变片的粘贴后,用 704 硅橡胶覆盖应变片以防止腐蚀与脱落,将应变片的接线从桩身上部提前布置的圆孔中引出,使用 AB 胶将柔性短桩重新粘贴完整,以保证柔性桩强度无明显降低。

“RF”系列试验研究循环荷载幅值的影响;“RP”系列试验研究循环荷载频率的影响;“RF-1”试验与“RP-1”试验对比分析土工格栅层数的影响。

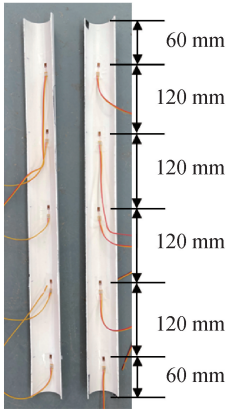
根据现有的循环加载模式和设计的循环加载方案，在试验中采用了正弦波来模拟交通荷载下的循环加载^[16]，如式(1)所示：

$$P(t) = P_0 + P \sin(\omega \cdot t)$$
 (1)

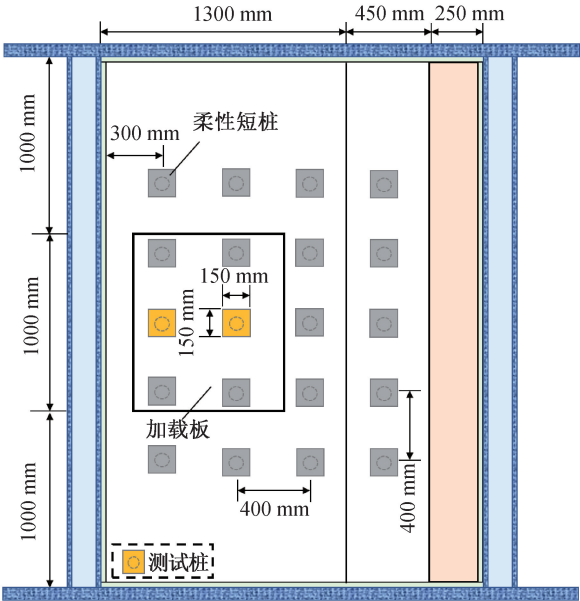
其中： P_0 为车辆静载，kN； P 为循环荷载的幅值，kN； v 为车速，km/h； l 为路面曲线波长； t 为加载时间，s；为了简化加载曲线模型，令 $\omega = 2\pi v/l$ ，表示荷载频率，Hz。



(a) 模型剖面图



(b) 桩身应变片布置实拍图



(c) 模型平面图



(d) 桩身与桩帽连接实拍图

图 2 模型试验装置示意图

表 2 模型试验方案

试验编号	桩型	格栅层数	荷载方式	循环幅值/kN	循环频率/Hz
RF-1	柔性短桩	2	$8 + 3\sin(2\pi t)$	3	1
RF-2	柔性短桩	2	$9 + 4\sin(2\pi t)$	4	1
RF-3	柔性短桩	2	$10 + 5\sin(2\pi t)$	5	1
RP-1	柔性短桩	1	$8 + 3\sin(2\pi t)$	3	1
RP-2	柔性短桩	1	$8 + 3\sin(4\pi t)$	3	2
RP-3	柔性短桩	1	$8 + 3\sin(8\pi t)$	3	4

结合试验条件,当循环荷载频率和幅值发生变化时,采用连续加载,加载示意图如图 3 所示。当改变循环荷载频率时, P_0 均设为 8 kN;当改变循环荷

载幅值时, P_0 分别设为 8、9 kN 和 10 kN。每组间维持在 P_0 荷载并持续 2 h。

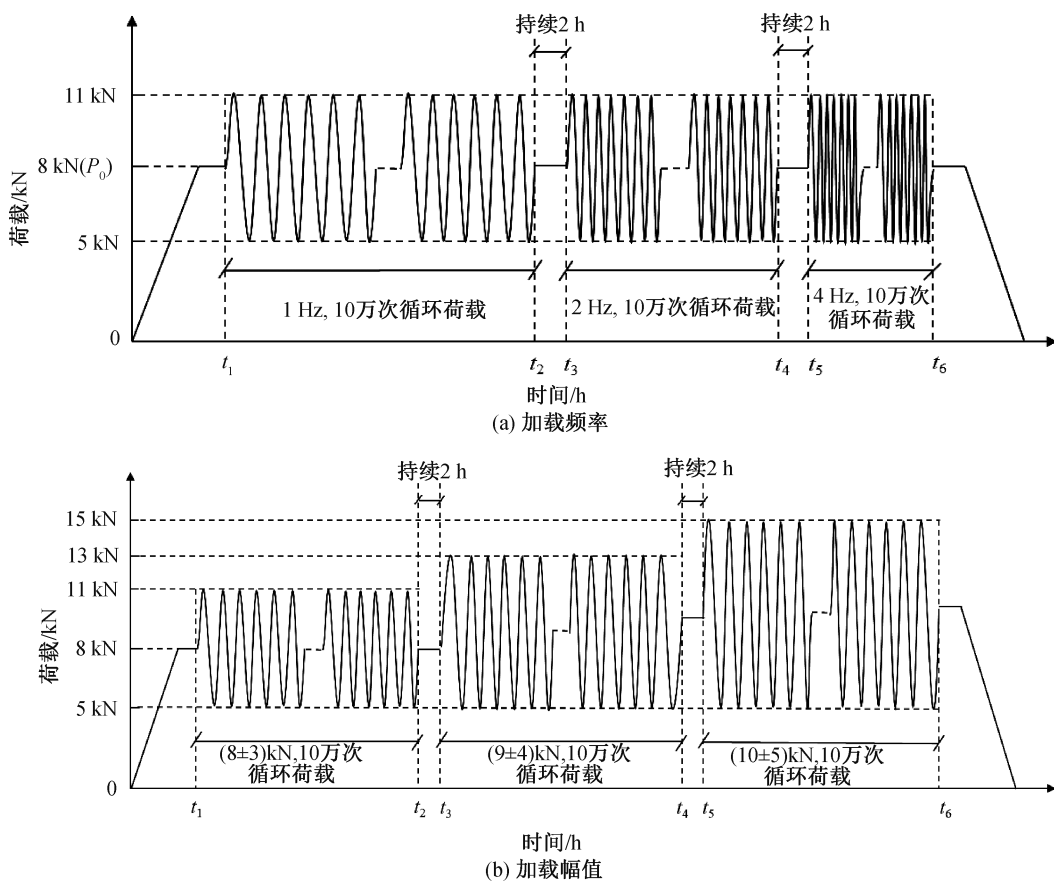


图 3 循环荷载加载曲线

2 结果与讨论

为了反映循环荷载下桩网复合地基受力变形特性,通过改变荷载幅值、荷载频率以及土工格栅层数,分析桩网复合地基沉降和桩身轴力的发展规律。本文中的地基沉降采用桩网复合地基坡顶竖向位移值;桩身轴力通过图 2(c)所示的两根试验桩的桩身应变平均值计算得到,用公式表示为:

$$N_i = \varepsilon_i \cdot E \cdot A_p \quad (2)$$

其中: N_i 为桩身轴力,N; ε_i 为桩身应变, $\mu\epsilon$; E 为柔性短桩的弹性模量,GPa; A_p 为柔性短桩的横截面积, m^2 。

2.1 桩网复合地基沉降

桩网复合地基坡顶沉降—循环次数变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,施加 10 万次循环荷载下桩网复合地基沉降随着循环次数的增大而增大,且沉降的发生主要集中在前 1 万次循环中。例如,在布置一层土工格栅工况的桩网复合地基中,前 1 万次

循环荷载后坡顶沉降为 1.16 mm,后 9 万次循环下沉降仅增加 1.66 mm。

由图 4(a)可知,随着循环荷载频率的增加,桩网复合地基坡顶沉降逐渐增大,这与文献[2]得到的结论一致。在 10 万次 1 Hz 的循环荷载后,桩网复合地基沉降为 2.82 mm,当循环荷载频率增加至 2 Hz 时(对应 10 万次至 20 万次循环阶段),坡顶沉降速率明显增大,且随着循环次数的不断增大逐渐稳定;当荷载频率继续增大至 4 Hz 时(对应 20 万次至 30 万次循环阶段),其沉降的增长幅值(3.12 mm)大于从 1 Hz 改变为 2 Hz 时对应的数值(2.11 mm)。

由图 4(b)可知,随着循环荷载幅值的增加,桩网复合地基坡顶沉降逐渐增大,这与文献[12]得到的结论一致。当荷载幅值从 3 kN 增大至 4 kN 和 5 kN,其最大累积沉降从 2.40 mm 增大至 2.98 mm 和 3.47 mm,分别增加了 24%和 45%。

由图 4(c)可知,当土工格栅为两层时,桩网复

合地基坡顶沉降与一层土工格栅时相比明显减小,这与文献[9]得到的结论一致。在10万次循环荷载后,铺设一层土工格栅的工况下复合地基沉降为2.82 mm,随着二层土工格栅中的上层土工格栅的加入,桩网复合地基沉降减小至2.40 mm,减少了15%。这是由于上层土工格栅的加入,使得上、下层土工格栅组成的水平加筋垫层的刚度增加,能将荷载更多地传递到桩上,增强了地基的稳定性。

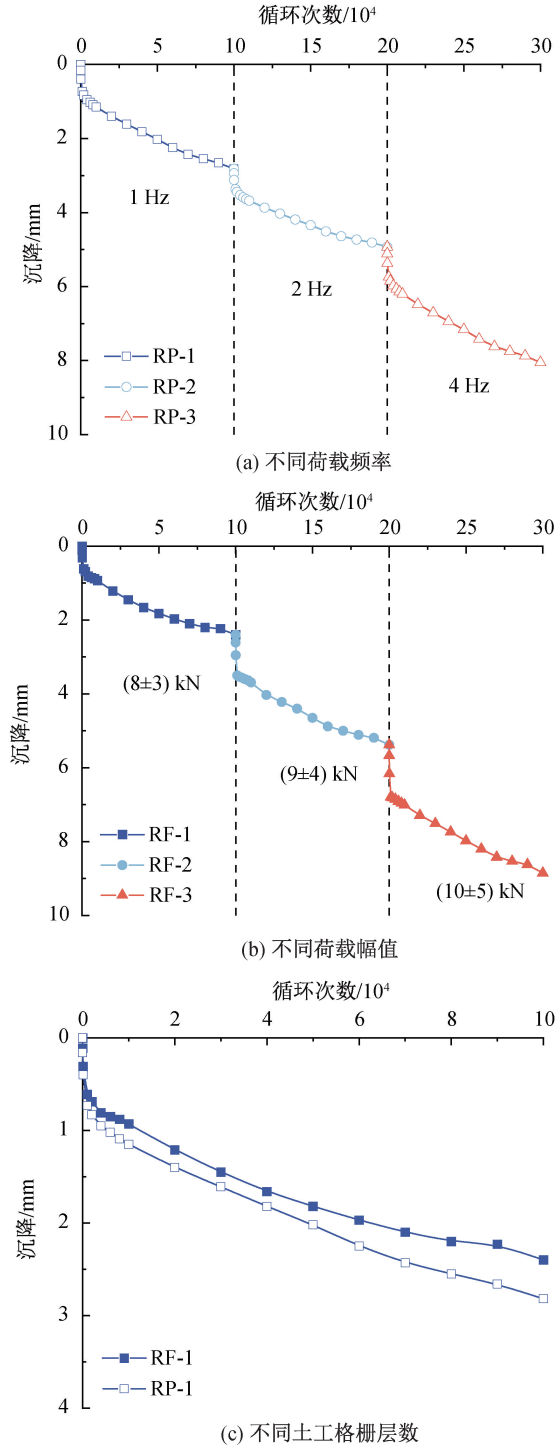


图4 桩网复合地基坡顶沉降—循环次数变化曲线

2.2 不同荷载幅值对承载力的影响

循环荷载下不同荷载幅值时桩网复合地基中桩身轴力随桩深的变化曲线如图5所示。由图5可知,循环荷载下桩网复合地基的桩身轴力随着桩深呈现先增大后减小的趋势,这表明在桩身上部周围土体的沉降速率大于桩基沉降速率,导致桩身上部出现了负摩阻力。这与文献[9]得到的规律一致。随着荷载幅值的增加,同一桩深处的轴力呈逐渐增大的规律,这与文献[1]得到的结论一致。如桩顶处,随着荷载幅值从3 kN增加至4 kN(循环荷载峰值增大了18%)与5 kN(循环荷载峰值增大了36%),10万次循环荷载后的桩身轴力分别增加了21%和46%。另外随着循环荷载次数的增加,相比于10万次(8 ± 3) kN循环荷载后桩身轴力的增加量(51.59 N),在 (9 ± 4) kN和 (10 ± 5) kN工况下分别增加了39.11%和65.78%,远大于循环荷载峰值的增幅。这表明随着循环荷载幅值的增加,桩间土承担的上部荷载逐步向桩顶传递。

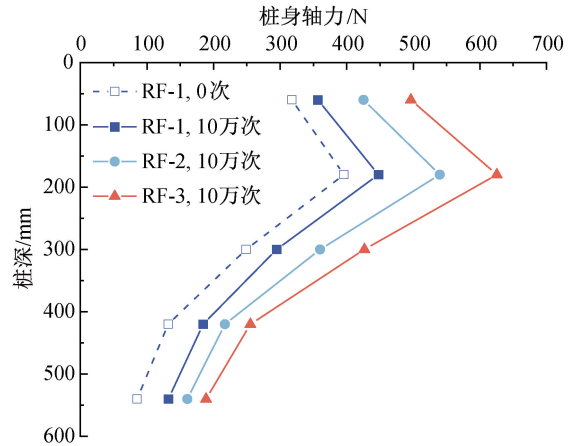


图5 不同荷载幅值时桩身轴力随桩深变化曲线

图6为循环荷载下不同荷载幅值时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化曲线。由图6可知:桩网复合地基中桩端阻力随沉降的发展逐渐增大,而桩侧总摩阻力则逐渐减小,这与文献[14]得到的结论一致;随着循环荷载幅值的增加,桩端阻力和桩侧总摩阻力均呈现出逐渐增大的趋势,且桩侧总摩阻力要大于桩端阻力。例如,10万次循环荷载后(图中为最大沉降时),桩端阻力随着荷载幅值从144.55 N增大至160.68 N和189.03 N,分别增大了11.15%和30.77%;桩侧总摩阻力则从222.86 N增大至264.46 N和306.05 N,分别增大了18.66%和37.33%。这表明随着荷载幅值的增加,桩端阻力与桩侧总摩阻力的发展速率相似。此外,不同幅值循环荷载下桩网复合地基中桩端阻力

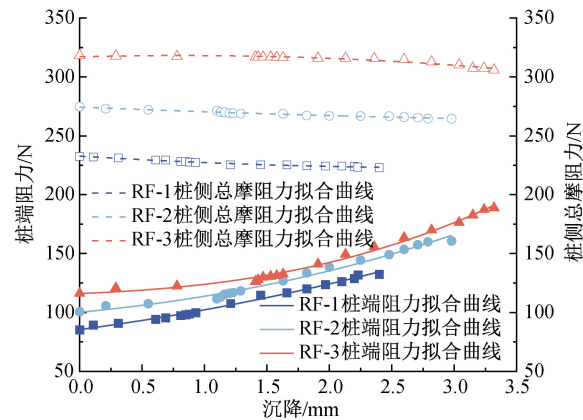


图 6 循环荷载下不同荷载幅值时桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的拟合曲线

与桩侧总摩阻力随沉降变化拟合关系分别用幂函数(式(3))和多项式函数(式(4))^[17-19]来表示:

$$F_{dz}=(S+a)^b+c$$

(3)

表 3 不同荷载幅值时拟合曲线的参数值

阻力类型	荷载幅值/kN	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
桩端阻力	3	3.93592	2.32602	61.24725	0.99214
	4	2.38381	2.56723	90.90231	0.98728
	5	1.16403	2.88945	114.59232	0.99249
桩侧总摩阻力	3	1.08189	−6.52553	232.76427	0.98369
	4	0.34845	−4.28224	274.38822	0.97152
	5	−1.71747	2.78559	317.11519	0.93104

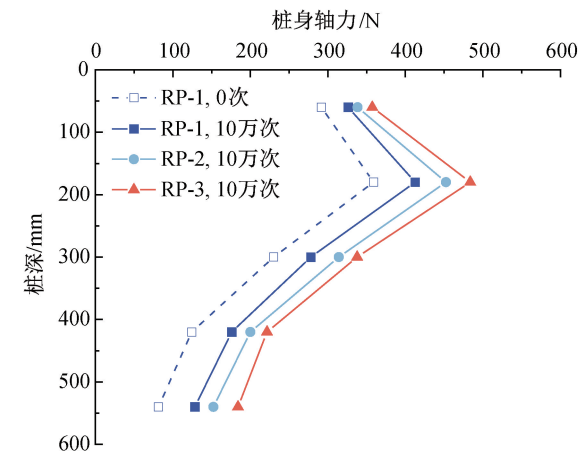


图 7 不同荷载频率时桩身轴力随桩深变化曲线

图 8 为循环荷载下不同荷载频率时桩网复合地基桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化曲线。由图 8 可知,当荷载频率从 1 Hz 增加至 4 Hz 时,桩网复合地基中的桩端阻力随沉降变化逐渐增大,桩侧总摩阻力则逐渐减小。随着循环荷载频率从 1 Hz 增加至 2 Hz 和 4 Hz,桩端阻力从 128.27 N 增加至 152.24 N 和 184.04 N;桩侧总摩阻力则从 195.86 N 减小至 186.10 N 和 156.45 N。这可能是因为荷载频率的增大会增加路堤土体振动频率并传递至桩

$$F_{cz}=a\cdot S^2+b\cdot S+c$$

(4)

其中: F_{dz} 为桩端阻力; F_{cz} 为桩侧总摩阻力; a 、 b 、 c 为拟合参数; S 为桩网复合地基沉降。

不同荷载幅值下拟合曲线的参数值见表 3。

2.3 不同荷载频率对承载力的影响

循环荷载下不同荷载频率时桩网复合地基桩身轴力随桩深变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,当循环荷载频率从 1 Hz 增加至 4 Hz 时,施加 10 万次循环荷载后的桩身轴力随之增大,这一规律与文献[1]研究得到的一致。例如,1 Hz 循环荷载循环 10 万次后,桩顶处轴力为 326.14 N;当频率增大至 2 Hz 和 4 Hz,桩顶处轴力分别增大至 338.34 N 和 357.38 N,增加了 3.73%和 9.58%。与图 5 对比可知,增加荷载频率对桩身轴力增长的促进作用要小于增加荷载幅值时的。

基,使得桩基与桩周淤泥质黏土的摩擦减小,更多的荷载由桩端阻力承担,这与文献[20]得到的结论近似。基于上述研究,循环荷载下不同频率时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的定量关系如图 8 所示。循环荷载下不同频率时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降的变化关系分别可用式(3)与式(4)来表示。不同荷载频率下拟合曲线的参数值见表 4。

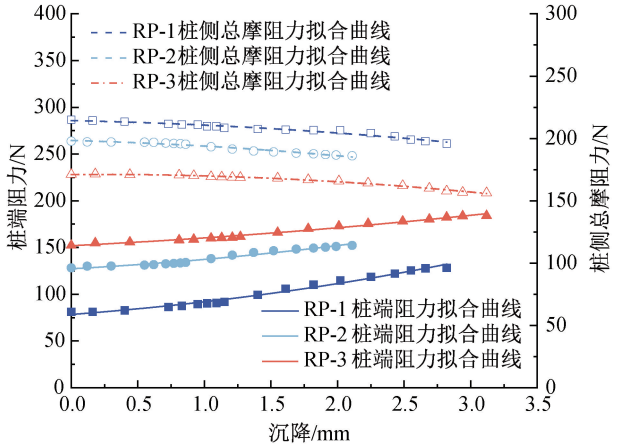


图 8 循环荷载下不同荷载频率时桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的拟合曲线

表 4 不同荷载频率时的曲线拟合结果

阻力类型	荷载频率/Hz	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
桩端阻力	1	2. 91750	2. 40628	65. 26090	0. 98452
	2	2. 06078	2. 43897	121. 84435	0. 96977
	4	1. 10087	2. 47088	153. 43016	0. 97116
桩侧总摩阻力	1	−1. 37468	−2. 20788	214. 32407	0. 96679
	2	−1. 61332	−2. 90645	198. 41960	0. 96788
	4	−1. 77631	0. 64083	171. 11735	0. 99081

2.4 不同土工格栅层数对承载力的影响

在(8±3) kN 循环荷载下不同土工格栅层数时桩网复合地基中桩身轴力随桩深变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知,同等情况下,土工格栅两层时(“RF-1”)桩网复合地基中的桩身轴力比一层土工格栅时(“RP-1”)的明显增大。同时发现,施加 10 万次循环荷载后,铺设两层土工格栅的桩网复合地基中桩身轴力的发展速率快于一层土工格栅工况。例如,桩顶处(60 mm 处),当土工格栅为一层时的桩身轴力为从 291. 70 N 增大至 326. 14 N,增大了 11. 81%;当土工格栅层数为两层时,其桩身轴力从 317. 64 N 增大至 356. 62 N,增加了 12. 27%。这是因为上层土工格栅的加入,增加了加筋垫层的刚度,使得更多的上部荷载被传递到桩上,这与文献[8]得到的结论一致。

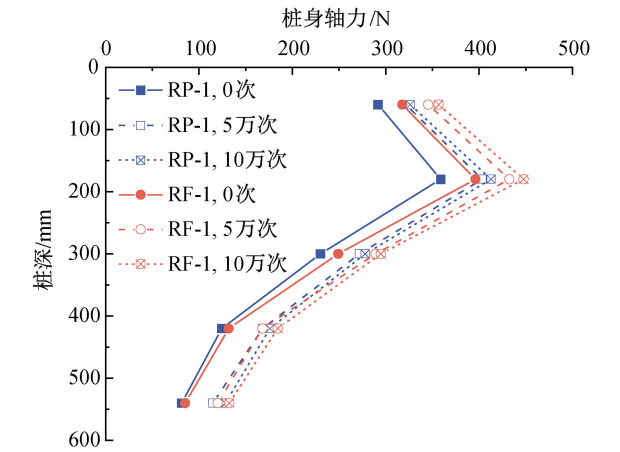


图 9 不同土工格栅层数时桩身轴力随桩深变化曲线

图 10 为循环荷载下不同土工格栅时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化曲线。图 10 表明,当土工格栅层数为两层时的桩端阻力与桩侧总摩阻力均大于一层格栅时的对应数值。例如,10 万次循环荷载后,当土工格栅层数为两层时的桩端阻力与桩侧总摩阻力分别为 132. 38 N 和 222. 86 N,较一层土工格栅时增大了 3. 20% 和 12. 94%。这表明上层土工格栅的加入会导致更多的上部荷载由桩侧总摩阻力承担。基于上述分析,进一步分析(8±3) kN 循环荷载下不同土工格栅层数时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的定量关系。图 10 显示了循环荷载下不同土工格栅层数时桩网复合地基中桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的拟合曲线,拟合关系可用式(3)与式(4)来表示,其拟合结果如表 5 所示。

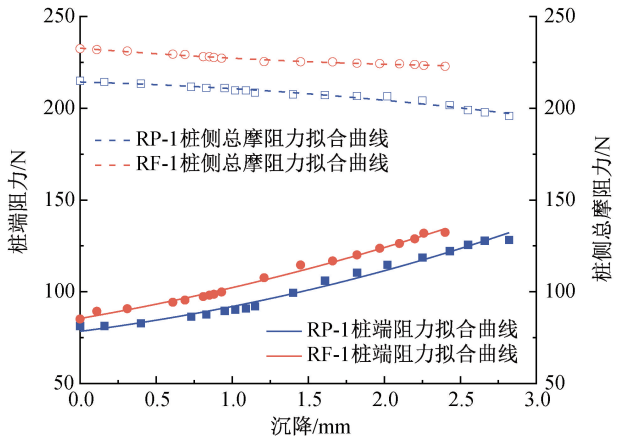


图 10 循环荷载下不同土工格栅层数时桩端阻力与桩侧总摩阻力随沉降变化的拟合曲线

表 5 不同土工格栅层数时的曲线拟合结果

阻力类型	土工格栅层数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
桩端阻力	1	2. 91750	2. 40628	65. 26090	0. 98452
	2	3. 93591	2. 32602	61. 24725	0. 99241
桩侧摩总阻力	1	−1. 37410	−2. 20865	214. 32388	0. 96670
	2	−0. 73995	−2. 52889	231. 68997	0. 99434

由式(3)—(4)可知,在桩端阻力随沉降变化拟合关系中,拟合参数 *a* 主要与桩网复合地基沉降相关,拟合参数 *b* 主要与桩端阻力发展趋势相关,而拟合参数 *c* 主要受桩端阻力大小的影响;在桩侧总摩

阻力随沉降变化拟合关系中,拟合参数 a 主要与桩侧总摩阻力发展趋势相关,拟合参数 b 主要与桩网复合地基沉降相关,拟合参数 c 主要受桩侧总摩阻力大小的影响。对比表 3—表 5 可知,在桩端阻力随沉降变化的拟合关系中,荷载幅值、荷载频率以及土工格栅层数主要影响拟合参数 a 和 c ;在桩侧总摩阻力随沉降变化的拟合关系中,荷载幅值主要影响拟合参数 a 和 b ,荷载频率主要影响拟合参数 b ,而土工格栅层数主要影响拟合参数 a 。这一结论可为后续针对桩间距、桩长、桩身刚度等参数的研究提供参考。

3 结 论

本文采用循环荷载下桩网复合地基受力变形模型,通过试验研究了循环荷载幅值、循环荷载频率及土工格栅层数对循环荷载下桩网复合地基的受力变形特性的影响,并分析了循环荷载下桩网复合地基中桩端阻力与沉降变化、桩侧总摩阻力与沉降变化的关系。本文主要结论如下:

a)循环荷载作用下桩网复合地基沉降随循环次数的增加而增大,且在循环前期时沉降的发展速率较快;加入上层土工格栅能有效减小地基沉降;增加循环荷载幅值和频率均会加速地基沉降的发展。

b)循环荷载下桩身轴力随桩深呈现出先增大后减小的规律;随着荷载幅值、荷载频率及土工格栅层数的增加,桩身轴力随之增大。循环荷载作用下桩网复合地基中的桩端阻力随着沉降的增大而增大,桩侧总摩阻力则逐渐减小;增加土工格栅层数和循环荷载幅值均能增大桩端阻力和桩侧总摩阻力,但随着荷载频率的增加,桩侧总摩阻力随沉降发展逐渐减小。

c)循环荷载下桩网复合地基中的桩端阻力随沉降变化关系可用幂函数描述,桩侧总摩阻力随沉降变化关系可用多项式函数描述。

参考文献:

- [1] 许家培. 循环荷载下刚性桩加筋垫层复合地基承载性状研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018: 19-39.
- [2] 曹玲珑. 循环荷载下刚性桩承加筋土复合地基承载变形性状研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019: 19-51.
- [3] 王宗琴, 张云鹏, 田乙, 等. 考虑固结的新近吹填场地桩侧负摩阻力分布特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,

- 2022, 54(8): 108-116.
- [4] 吕亚茹, 丁选明, 刘汉龙, 等. 刚性荷载下现浇 X 形桩复合地基桩侧摩阻力数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2134-2140.
- [5] Jiang P C, Xu W, Zhang Y J. Analysis of the bearing behaviour of a screw-pile foundation in silt soil[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2019, 172(4): 257-263.
- [6] 董俊利, 聂如松, 冷伍明, 等. 螺旋桩复合地基桩土应力比模型试验与数值模拟[J/OL]. 铁道科学与工程学报. (2022-4-16) [2022-09-08]. <http://10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211269>.
- [7] 刘开富, 许家培, 曹玲珑. 刚性桩加筋垫层复合地基承载性状数值分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 372-377.
- [8] 张玲, 徐泽宇, 赵明华. 循环荷载作用下筋箍碎石桩复合地基工作性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2198-2205.
- [9] 李天宝, 许家培, 刘开富. 循环荷载下刚性桩对桩承加筋垫层复合地基承载性状影响[J]. 工业建筑, 2021, 51(11): 137-142.
- [10] 牛婷婷, 孙广超. 高速铁路 X 形桩桩网复合地基动态响应分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1266-1280.
- [11] 孙广超, 李建林, 孔纲强, 等. 长期列车荷载下无砟轨道 X 形桩-筏复合地基动力响应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 961-969.
- [12] 何杰, 高建喜, 孟森松, 等. 软土地基上循环荷载作用下加筋碎石垫层工作特性分析[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(1): 35-40.
- [13] 杨以国, 刘开富, 谢新宇. 循环荷载下长短桩桩网复合地基变形试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1027-1035.
- [14] 陈贤可, 刘海涛, 吴健, 等. 循环荷载下桩网复合地基中桩的承载特性分析[J]. 水利规划与设计, 2022(8): 123-127.
- [15] Alotaibi E, Omar M, Shanableh A, et al. Geogrid bridging over existing shallow flexible PVC buried pipe-Experimental study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103945.
- [16] Zhuang Y, Wang K Y. Finite element analysis on the dynamic behavior of soil arching effect in piled embankment[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 8-21.
- [17] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1053-1058.
- [18] 张伟锋, 陈盛原, 韦未. 堆载作用下复合软土地基的沉降规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 729-740.

[19] 应宏伟, 黄兆江, 葛红斌, 等. 基于分级加载工况的沉降曲线拟合法及工程运用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(2):300-305.

[20] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5):832-840.

(责任编辑:康 锋)